



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV VODNÍCH STAVEB**

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**PROUDĚNÍ V PROSTORU ŠACHTOVÉHO  
PŘELIVU VD LABSKÁ**

FLOW STRUCTURE IN SHAFT SPILLWAY AREA OF OF LABSKÁ DAM

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jiří Šváb

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. ZBYNĚK ZACHOVAL, Ph.D.

**BRNO 2017**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav vodních staveb

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Jiří Šváb
<b>Název</b>	Proudění v prostoru šachtového přelivu VD Labská
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2016
<b>Datum odevzdání</b>	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Fyzikální model.

AQUAVEO, 2013. SMS User Manual (v11.1) Surface-water Modeling System.

[http://smsdocs.aquaveo.com/SMS\\_User\\_Manual\\_v11.1.pdf](http://smsdocs.aquaveo.com/SMS_User_Manual_v11.1.pdf)

Broža, V., Kratochvíl, J., Peter, P., Votruba, L. 1987. Přehrady. Praha: SNTL/ALFA.

Jandora, J., Šulc, J. 2006. Hydraulika. Brno: AN CERM.

Met-Flow S.A., 2002. UVP Monitor – Model UVP-XW-PSi with new software version 3. User´s guide. Lausanne: Met-Flow S.A.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešerše materiálů zabývajících se přepadem přes šachtový přeliv.

Pojednání o fyzikálním modelování.

Pojednání o měření rychlostí UVP Monitorem XW-PSi.

Změření rychlostního pole a úrovně hladiny na fyzikálním modelu šachtového přelivu VD Labská při maximální hladině.

Přepočet rychlostního pole a úrovně hladiny na prototyp.

Závěr a zhodnocení.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## ABSTRAKT

Bakalářská práce je rozdělena na literární rešerši a praktickou část (vlastní měření). Obsahem literární rešerše je popis šachtového přelivu, vodního díla Labská a měřicích zařízení. V praktické části je provedeno měření rychlostí, úrovně hladiny a rozdělení průtoku na modelu šachtového přelivu. Výsledkem je vyhodnocení horizontálních rychlostí pro dvě úrovně měření, vyhodnocení úrovně hladiny a rozdělení průtoku.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Šachtový přeliv, česle, UVP monitor, hrotové měřidlo, fyzikální model, úroveň hladiny.

## ABSTRACT

The bachelor thesis is divided into literary research and practical part (own measurement). The content of the literary research is a description of the shaft spillway, the Labská dam and the measuring equipment. The practical part is focused on measurement of the horizontal velocity, flow distribution and water surface elevation on the shaft spillway physical model. The results are horizontal velocity for two levels, water surface elevation and flow distribution.

## KEYWORDS

Shaft spillway, trash racks, UVP Monitor, point gauge, physical model, velocity, water surface elevation.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Jiří Šváb *Proudění v prostoru šachtového přelivu VD Labská*. Brno, 2017. 38 s.,  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav  
vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2017

---

Jiří Šváb  
autor práce

# PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2017

---

Jiří Šváb  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D. za odborné vedení mojí práce, ochotu a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Dále bych chtěl poděkovat Povodí Labe, s.p. a HG partner s.r.o., kteří mi poskytnuli materiály ke zpracování této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svoji rodině a přátelům za podporu během celého studia.



# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CÍL PRÁCE A METODA ŘEŠENÍ .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>ŠACHTOVÝ PŘELIV .....</b>	<b>3</b>
3.1	PARAMETRY ŠACHTOVÉHO PŘELIVU .....	3
3.1.1	<i>Kapacita přelivu .....</i>	<i>4</i>
<b>4</b>	<b>VODNÍ DÍLO LABSKÁ.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>OPATŘENÍ PRO ZVÝŠENÍ KAPACITY ŠACHTOVÉHO PŘELIVU.....</b>	<b>11</b>
5.1	FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ.....	12
5.1.1	<i>Geometrická podobnost.....</i>	<i>12</i>
5.1.2	<i>Kinematická podobnost.....</i>	<i>12</i>
5.1.3	<i>Dynamická podobnost.....</i>	<i>12</i>
5.2	FYZIKÁLNÍ MODEL .....	14
5.3	MĚŘIDLA.....	16
5.3.1	<i>UVP monitor .....</i>	<i>16</i>
5.3.2	<i>Princip měření.....</i>	<i>16</i>
5.3.3	<i>Převodníky.....</i>	<i>19</i>
5.3.4	<i>Hrotové měřidlo.....</i>	<i>22</i>
5.4	MĚŘENÍ .....	23
5.4.1	<i>Měření horizontálních rychlostí.....</i>	<i>24</i>
5.4.2	<i>Měření úrovně hladiny.....</i>	<i>26</i>
5.5	VYHODNOCENÍ .....	27
5.5.1	<i>Vyhodnocení rychlostí.....</i>	<i>27</i>
5.5.2	<i>Vyhodnocení úrovně hladiny.....</i>	<i>30</i>
5.5.3	<i>Vyhodnocení rozdělení průtoku.....</i>	<i>31</i>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAMY.....</b>	<b>36</b>
7.1	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	36
7.2	SEZNAM TABULEK .....	36
7.3	SEZNAM VELIČIN .....	37
7.4	SEZNAM ZKRATEK .....	37
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>38</b>

# 1 Úvod

Každé vodní dílo, které slouží pro akumulaci vody a zároveň do něj přitéká voda, musí být dle normy ČSN ISO 75 2340 osazeno bezpečnostním přelivem [1]. Tento přeliv slouží k bezpečnému převedení povodňových průtoků, které by jinak přetekly přes těleso hráze a mohly by způsobit škody v podhrází, včetně možného poškození hráze a jejího následného kolapsu.

Bezpečnostních přelivů je mnoho druhů a každý z nich je vhodný pro určitý typ přehradní hráze. Šachtový přeliv je vhodný u přehrad, kde je obtížné vytvořit korunový nebo boční přeliv. Jeho nevýhodou je, že při vyšších průtocích může proudění přejít do zahlceného režimu, při kterém již přeliv není schopen převádět větší množství vody i při zvyšující se úrovni hladiny. Dalším omezujícím aspektem je možnost ucpání průtočného profilu plovoucími předměty, například částmi stromů. Tomuto nebezpečnému stavu se zabráňuje pomocí česlí a záchytného systému pláví.

Pro výpočet kapacity přelivu je možné využít matematického modelování a tyto výpočty verifikovat pomocí fyzikálního modelu. Je možno modelovat chování přelivu za různých povodňových stavů včetně pohybu pláví a jeho vlivu na kapacitu přelivu.

Na proudění v okolí šachtového přelivu má vliv i vzdálenost od svahu. Pokud má svah velký sklon a zároveň se nachází blízko přelivu, dochází k negativnímu ovlivňování proudění. V případě šachtového přelivu na přehradě Labská bylo tomuto stavu zamezeno vytvořením opěrné zdi, která vymezuje po obvodu přelivu přibližně 7 m široký volný prostor.

## 2 Cíl práce a metoda řešení

Cílem práce bylo stanovit charakter proudění v okolí šachtového přelivu VD Labská při maximální hladině.

Metoda řešení vycházela ze skutečnosti, že nebylo možné stanovit charakter proudění na prototypu, proto ho bylo nutné stanovit na fyzikálním modelu a následně jej přepočítat dle modelové podobnosti na prototyp.

Pro stanovení charakteru proudění bylo zvoleno měření plošného rychlostního pole ve dvou výškových úrovních a měření úrovně hladiny. Měření bylo provedeno na zmenšeném fyzikálním modelu v měřítku délek 1:28,5. Měřeno bylo bodově v půdorysném rastru bodů s takovou plošnou hustotou, aby měřené veličiny dostatečně přesně vystihovaly charakter proudění.

Pro stanovení vektorů plošných rychlostí byly měřeny obě složky rychlosti pomocí zařízení UVP Monitor XW PSi. Zařízení pracuje na Dopplerově principu vysílání a přijímání ultrazvukových vln. Výsledky měření byly zpracovány v programu SMS 11.0 a byla vytvořena vektorová mapa rychlostí ve dvou výškových úrovních.

Měření úrovně hladiny bylo provedeno ve stejných bodech jako měření rychlostí a to za pomoci hrotového měřidla. Z měřených dat byla vytvořena mapa úrovně hladiny.

Na základě vyhodnocení úrovně hladiny a map vektorů horizontálních rychlostí bylo popsáno proudění v okolí šachtového přelivu.

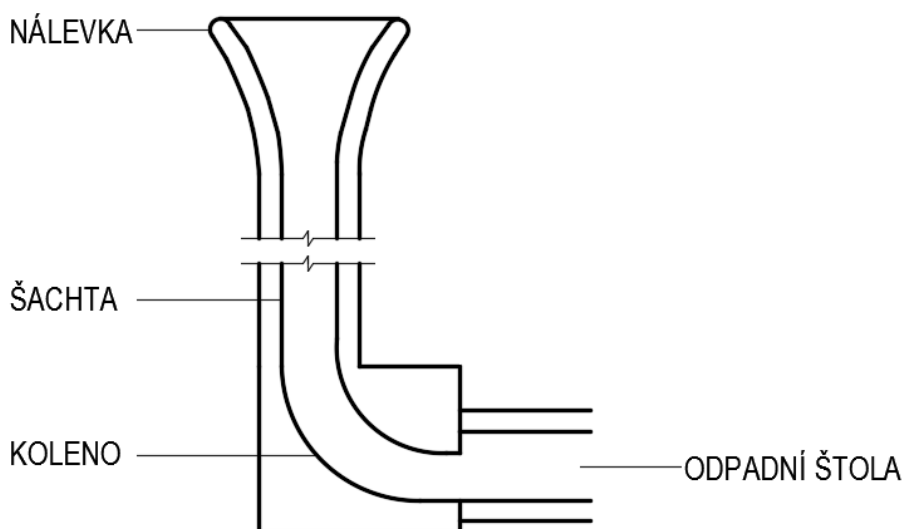
### 3 Šachtový přeliv

U šachtového přelivu je voda přepadající přes korunu odváděna nejdříve svislou šachtou, která skrze zužující se koleno se změnou tvaru příčného profilu plynule přechází do mírně skloněné odpadní štolky a dále navazuje na vývar, který slouží k tlumení energie odváděné vody. Přelivnou hranu tvoří obvykle uzavřená křivka, nejčastěji kružnice [2]. Proudění v šachtovém přelivu je z hydraulického hlediska složité, ovlivňuje ho mnoho parametrů jako např. tvar přelivné hrany, její průměr, průměr svislé šachty, velikost a sklon odpadní štolky.

První šachtový přeliv byl postaven v roce 1896 v Anglii, na přehradě Blacktor [2]. Na Českém území byl šachtový přeliv použit nejprve na přehradách Labská a Les Království. Zmíněné přehrady se zařadily mezi prvních 10 přehrad z celého Světa, na kterých byl použit tento typ přelivu.

#### 3.1 Parametry šachtového přelivu

Šachtový přeliv je tvořen nálevkou, šachtou, kolenem a odpadní štolou (Obr.3.1) [2].



Obr. 3.1 Šachtový přeliv

Přeliv bývá nejčastěji proudnicový nebo u nízkých přelivů se širokou korunou. Proudnicový přeliv se používá v případě hydraulicky vysokých přelivů, kdy nedochází ke změně tvaru přepadového proudu při relativní změně výšky přelivu. Jedná se o případy, kdy je šachtový přeliv volně stojící, nebo pokud výška výrazněji přesahuje nad úroveň terénu. Přeliv se širokou korunou se dříve používal vždy v případě hydraulicky nízkých přelivů, kdy nebyl známý tvar proudnicového přelivu. Jednalo se o případy, kdy byl přeliv umístěn na břehu. Na koruně se často nacházejí usměrňovací žebra, která brání vzniku vírů a tím zabraňují snížení kapacity přelivu, nebo naopak vytvářejí rotační pohyb v šachtě a zabraňují tak uzavírání vzduchových bublin v šachtě.

Šachta je vždy prizmatického tvaru a její osa je svislá, pouze ve výjimečných případech je mírně odkloněná od svislice.

Koleno slouží pro přechod ze svislé šachty do odpadní štol. Koleno je poproudně se zužující a navrhuje se pokud možno s co největším poloměrem křivosti pro zlepšení hydraulických vlastností. Poproudně se příčný profil mění z kruhu na kruhovou úseč (kruhový profil odpadní štol), nebo se mění na obdélník (obdélníkový profil odpadní štol).

### 3.1.1 Kapacita přelivu

Průtok, který je přeliv schopen převést, se spočítá dle rovnice

$$Q = mb_0\sqrt{2g}h^{3/2}, \quad 3.1$$

kde  $m$  je součinitel přepadu (0,45 ~ 0,46 v případě proudnicového přelivu) a (0,35 ~ 0,36 v případě přelivu se širokou korunou),

$b_0$  je účinná délka přelivné hrany,

$h$  je přepadová výška.

Pokud je koruna přelivu volná, spočítá se účinná délka přelivné hrany  $b_o$  následovně:

$$b_o = \pi D , \quad 3.2$$

kde  $D$  je průměr koruny přelivu.

Nevýhodou šachtových přelivů je, že při výrazném zvýšení přepadové výšky může dojít k jejich zahlcení [2]. Pokud nastane tento stav, tak se při dalším zvětšování přepadové výšky jen velmi málo zvětšuje průtok odváděné vody. K zahlcení přelivu dojde v momentě, kdy se průtok  $Q_{krit}$  rovná maximálnímu možnému průtoku, který je celá soustava (přeliv i odpadní štola) schopná převést. Limitní průtok obvykle určuje koleno, kde dochází k přeměně tlakového proudění ze svislé šachty do proudění v režimu s volnou hladinou v odpadní štole. V daném případě platí

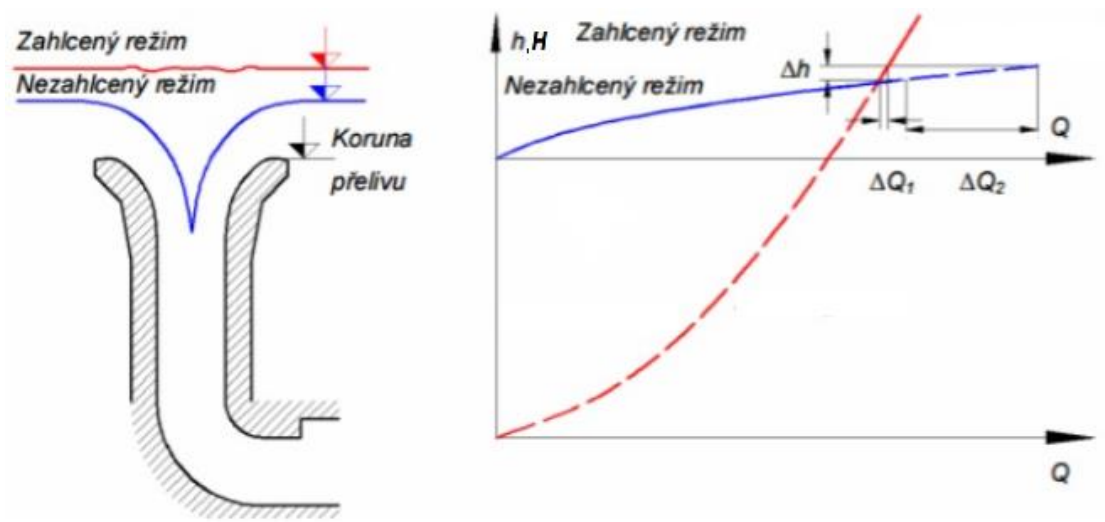
$$Q_{krit} = \mu S \sqrt{2gH} , \quad 3.3$$

kde  $\mu$  je součinitel výtoku,

$S$  je plocha průřezu,

$H$  je tlaková výška.

Konzumční křivka bezpečnostního objektu se skládá ze dvou dílčích křivek, křivky přepadu, daného rovnicí (3.1) a křivky výtoku, daného rovnicí (3.3) [3]. Poloha hladiny v nádrži je při malých průtocích dána křivkou přepadu (nezahlcený režim) a při velkých průtocích křivkou výtoku (zahlcený režim). Pokud dojde k překročení průtoku, kdy se obě křivky kříží, dojde k rychlému nárůstu hladiny v nádrži (Obr. 3.2). V obrázku je dále znázorněno, že  $\Delta Q_1$  platí pro zahlcený režim,  $\Delta Q_2$  platí pro nezahlcený režim, přičemž  $\Delta h$  je konstantní. Režim proudění se změní na zahlcený a dojde ke změně přepadu z dokonalého na nedokonalý.



Obr. 3.2 Konzumní křivka šachtového přelivu [3]

Z konstrukčního hlediska je možno šachtové přelivy budovat jako volně stojící betonové objekty, jejichž odpadní štola je obvykle vedena tělesem hráze, nebo jsou vedeny mimo přehradní těleso, většinou skalním masivem [2].

Pokud je odpadní štola vedena skrz těleso hráze, je bezpodmínečně nutné ve štole zajistit proudění o volné hladině. Jinak by mohlo při tlakovém režimu proudění docházet ke vzniku vibrací, které jsou vyvolány pneumatickými jevy, jenž proudění v šachtovém přelivu často doprovázejí. K jejich minimalizaci slouží zavzdušnění, které má vyústění za kolenem a zajišťuje ve štole podmínky pro proudění o volné hladině.

## 4 Vodní dílo Labská

Vodní dílo Labská se nachází v Královohradeckém kraji, nedaleko Špindlerova mlýna, 11,6 km od pramene řeky Labe [4]. Hlavním účelem vodního díla je zachycování povodňových průtoků z centrální části Krkonoš. V suchých obdobích slouží pro nadlepšování průtoků v korytě pod hrází a dále k rekreaci a k výrobě elektrické energie. Hráz je znázorněna na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Labská Přeprava [5]

Stavební práce byly započaty v roce 1910 výlomem tunelu v levé části údolí. Tímto tunelem byly převáděny průtoky mimo staveniště [4]. Jelikož byl tunel vylámán v pevné skále, nebylo nutné ho celý opevňovat betonem, pouze se obezdily nedostatečně pevné části (vtokový a výtokový portál). Únosná rula se nacházela v pravé části až v hloubce 16 m pod povrchem terénu, tudíž bylo nutné provádět rozsáhlé zemní práce a odstranit velké množství neúnosných a zvětralých vrstev horniny.

Vlastní těleso hráze je tížného typu, zděné z rulového kamene, s poloměrem hráze v půdorysu 170 m [4]. Jako pojivo byla použita malta cementová a trasová. Pro omezení průsaků byla na návodním líci aplikována 3 cm silná vrstva tvořená cementovou omítkou s nátěrem Siderostenu (vodotěsný materiál vytvořený z olejů, dehtů, parafínů



a kaučuku). Toto opatření je z vnějšku chráněné ochranným pláštěm proti mechanickému poškození.

Pro převádění povodňových průtoků je přehrada vybavena dvěma typy bezpečnostních přelivů [6]. Na hrázi se nachází korunový přeliv, který je tvořen čtyřmi přelivnými poli. Každé pole má světlost téměř 9,90 m a dohromady dokážou převést až 74 m<sup>3</sup>/s. Energie dopadající vody je utlumena pomocí vyzdění kaskády. U levého břehu se nachází šachtový přeliv, který je zděný z lomového kamene. Průměr koruny přelivu je 11,5 m, je opatřen česlovou konstrukcí a obslužnou lávkou. Na přeliv postupně navazuje 5 m široká odpadní šachta, která plynule přechází pomocí kolena do odpadní štoly. Štola je ražená ve skále, příčný profil štoly je podkovovitý s rozměrem 7 m × 7 m o celkové délce 149,35 m.

Pro vypouštění vody z nádrže slouží celkem 5 spodních výpustí [6]. Levá základová výpust je průměru 1,1 m a dokáže převést průtok až 11,6 m<sup>3</sup>/s. Další 5 výpustí o průměru 1 m a s celkovou kapacitou až 89,9 m<sup>3</sup>/s je zaústěno do obtokového tunelu.

V roce 1993 byla pod hrází vybudována malá vodní elektrárna (MVE), která je osazena čtyřmi turbínami typu Banki a asynchronními generátory [4]. Celková hltnost turbín je 4 m<sup>3</sup>/s a dosažitelný výkon 207 kW. Toto soustrojí dokáže ročně vyrobit průměrně 1,2 MWh.

Nadmořské výšky významných úrovní hladin jsou [7]:

Hladina stálého nadržení: 678,66 m n. m.

Hladina zásobního prostoru: 684,62 m n. m.

Hladina ovladatelného prostoru (koruny přelivů): 691,26 m n. m.

Hladina maximální: 692,34 m n. m.

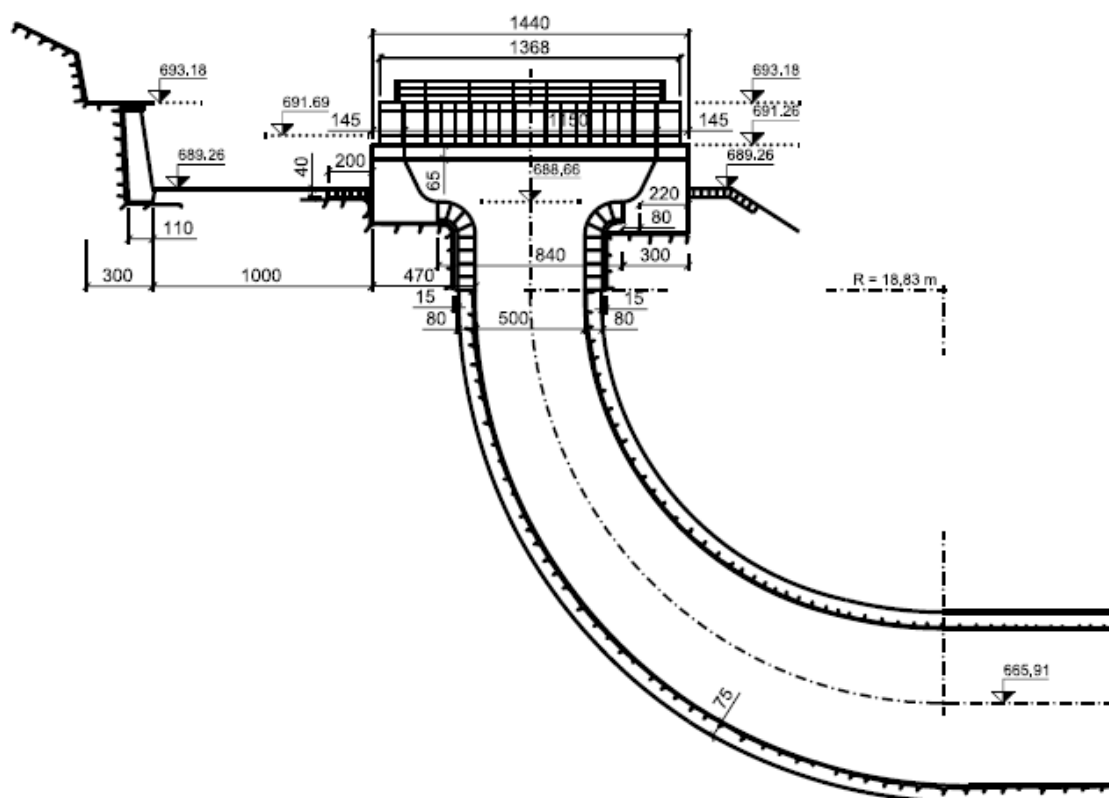
Hladina mezní bezpečná: 694,16 m n. m.

N-leté průtoky jsou měřeny v několika měrných profilech. Hodnoty průtoků jsou zobrazeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: N-leté průtoky [7]

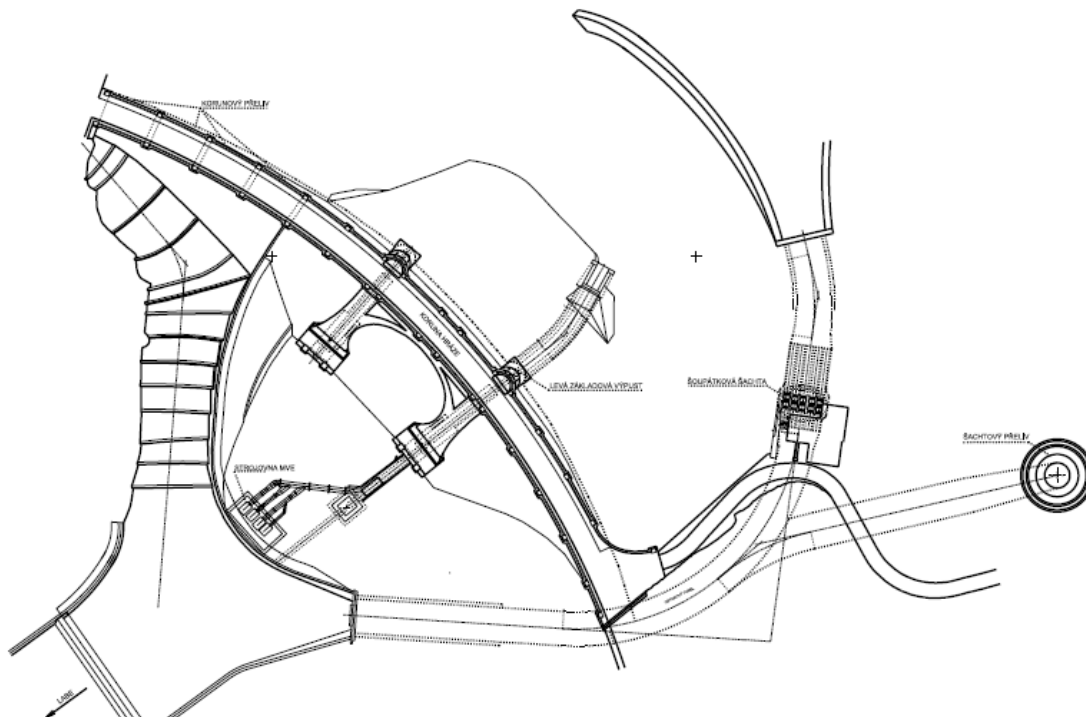
N-letost	VS Špindlerův mlýn	Hráz VD Labská (neovlivněné průtoky)	VS Labská (ovlivněné průtoky)
[-]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
1	33,9	37,5	28,3
2	48,2	53,2	40,2
5	70	77,1	58,2
10	88,4	97,1	73,3
20	108	119	89,6
50	137	150	113
100	160	175	132
Třída přesnosti:	I.	II.	I.

Podélný řez šachtového přelivu je zobrazen na Obr. 4.2.



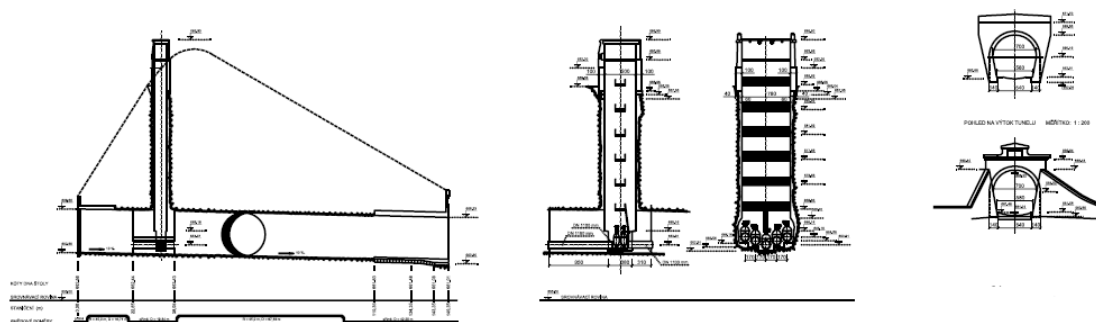
Obr. 4.2 Řez šachtovým přelivem [8]

Celková situace hráze, včetně umístění šachtového přelivu na levém břehu je zobrazena na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Situace hráze [8]

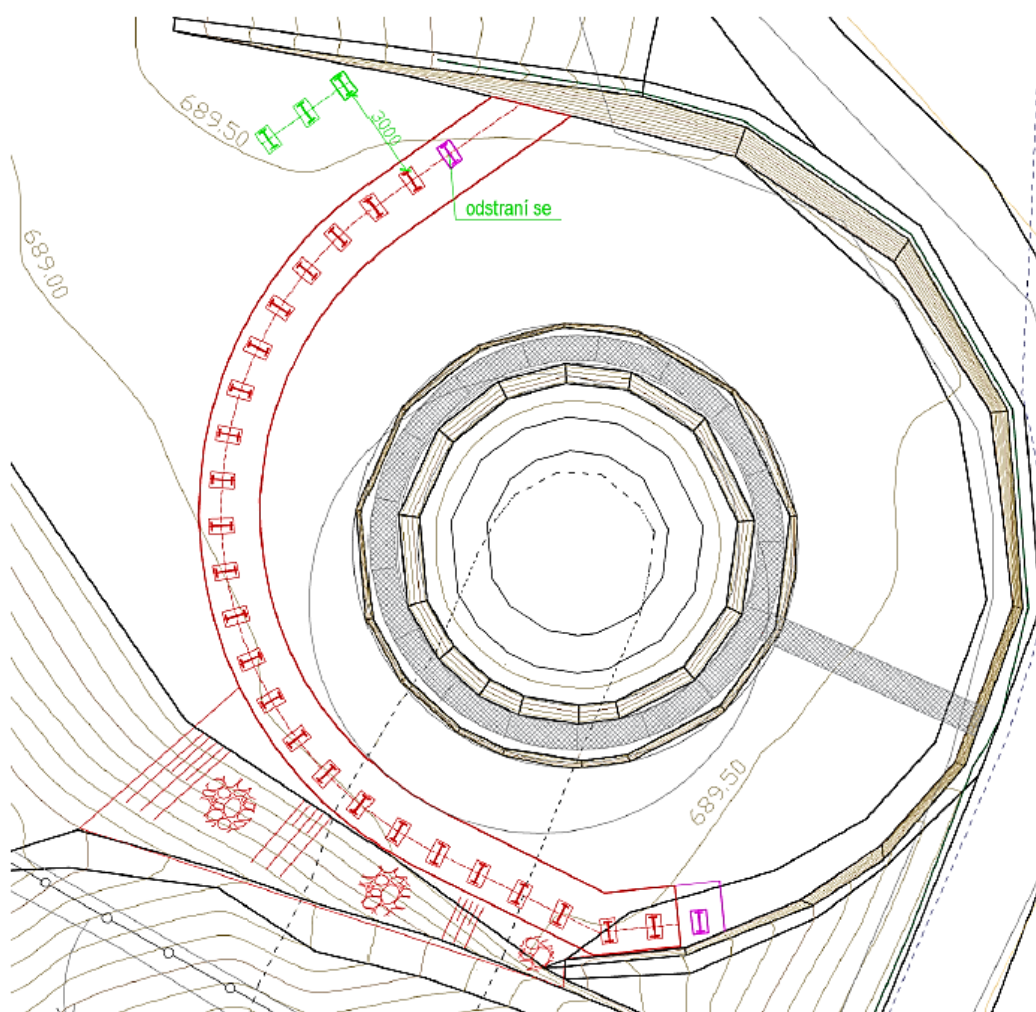
Odpadní štola vedoucí ze šachtového přelivu je zaústěna do obtokového tunelu, který je zobrazen na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Obtokový tunel [8]

## 5 Opatření pro zvýšení kapacity šachtového přelivu

Během povodní docházelo k unášení dřevěného pláví a dalších plovoucích předmětů, které se zachycovaly na česlích šachtového přelivu a snižovaly kapacitu přelivu. Jako opatření proti tomuto negativnímu stavu byl navržen záchytný systém pláví v podobě ocelových stojin, které byly umístěny v určité vzdálenosti před šachtový přeliv. Stojiny dosahují výšky až 4,6 m a jejich rozmístění je patrné na Obr. 5.1 (bez zelené varianty).



Obr. 5.1 Záchytný systém pláví [7]

## 5.1 Fyzikální modelování

Aby mohlo být pozorování a měření hydraulických parametrů na modelu a na prototypu považováno za odpovídající si, musí být proudění na modelu a ve skutečnosti navzájem podobné [9]. Tato podobnost vychází z předpokladu, že 2 jevy jsou si vzájemně mechanicky podobné, pokud jsou splněny následující podmínky podobnosti: geometrická a dynamická.

### 5.1.1 Geometrická podobnost

Podmínkou pro splnění geometrické podobnosti je předpoklad, že pro 2 libovolné, sobě odpovídající rozměry musí být zachován stálý poměr [9]. Geometrická podobnost je určena měřítkem délky

$$M_l = \frac{l_p}{l_m}, \quad 5.1$$

kde  $l$  je vztažná délka.

### 5.1.2 Kinematická podobnost

Podmínkou pro splnění kinematické podobnosti je předpoklad, že 2 kinematické děje jsou si podobné, pokud jsou si trajektorie odpovídajících si bodů podobné v odpovídajících si časech [7]. Kinematická podobnost je určena měřítky délek v jednotlivých směrech  $M_{lx}$ ,  $M_{ly}$ ,  $M_{lz}$  a měřítko času

$$M_t = \frac{t_p}{t_m}, \quad 5.2$$

kde  $t$  je vztažný čas.

### 5.1.3 Dynamická podobnost

Podmínkou pro splnění dynamické podobnosti je předpoklad, že 2 kinematické děje jsou si podobné, pokud jsou si podobné poměry působících sil v odpovídajících si bodech a časech [9]. Dynamická podobnost je určena měřítky délek v jednotlivých směrech  $M_{lx}$ ,  $M_{ly}$ ,  $M_{lz}$ , měřítko času  $M_t$  a měřítko sil v jednotlivých směrech

$$M_{Fx} = \frac{F_{px}}{F_{mx}}; M_{Fy} = \frac{F_{py}}{F_{my}}; M_{Fz} = \frac{F_{pz}}{F_{mz}}, \quad 5.3$$

kde  $F$  je vztažná síla.

Při proudění kapalin se uplatňují hlavně síly tíže, tření a povrchového napětí [9]. Z obecného Newtonova zákona lze odvodit zjednodušeně další zákony, pokud předpokládáme, že působí jen jeden druh sil nebo tento druh síly převažuje nad ostatními:

**a) Převažující účinek mají síly tíže**

Podmínkou je, aby hodnota Froudova kritéria pro model i pro prototyp byla shodná dle vztahu

$$Fr = \frac{v^2}{gl} = idem., \quad 5.4$$

kde  $v$  je charakteristická rychlost,  
 $g$  je tíhové zrychlení,  
 $l$  charakteristická délka.

**b) Převažující účinek mají síly tření**

Podmínkou je, aby hodnota Reynoldsova kritéria pro model i pro prototyp byla shodná dle vztahu

$$Re = \frac{vl}{\nu} = idem., \quad 5.5$$

kde  $v$  je charakteristická rychlost  
 $l$  charakteristická délka,  
 $\nu$  je kinematická viskozita.

Jelikož bylo modelováno plně turbulentní proudění, nezávisí součinitel tření na Reynoldsově kritériu. Minimální hodnota Reynoldsova kritéria pro plně turbulentní proudění pak určuje mezní podmínku podobnosti.

**c) Převažující účinek mají síly povrchového napětí**

Podmínkou je, aby hodnota Weberova kritéria pro model i pro prototyp byla shodná dle vztahu

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma} = idem., \quad 5.6$$

kde  $v$  je charakteristická rychlost,

$l$       charakteristická délka,

$\sigma$      je povrchové napětí.

V případě použití vody na modelu určuje Weberovo kritérium mezní podmínku podobnosti (míru zmenšení modelu).

## 5.2 Fyzikální model

Fyzikální model byl vytvořen v měřítku 1:28,5 a skládal se z několika částí: podkladní rošt, nádrže pro šachtový přeliv a vtok do obtokového tunelu, napojení na čerpací systém, šachtový přeliv a odpadní šachta šachtového přelivu, prostor šachtového přelivu, záchytný systém plávi šachtového přelivu, česle a vtok do obtokového tunelu, spodní výpusti, odtoková část obtokového tunelu a vývar [7].

Šachtový přeliv byl vytvořen na soustruhu ze dřeva. Jako opatření proti dilataci vlivem vlhkosti, byl model napuštěn a natřen ochranným nátěrem, čímž byl vytvořen hladký povrch, který korespondoval s drsností povrchu na prototypu.

Na korunu přelivu byla do zářezů osazena lávka s podpěrami, které byly vytvořeny z nerezového plechu. Tyto plnostěnné podpěry omezují vznik rotace proudu v nálevce a následný vznik vírů.

Nádrž pro šachtový přeliv byla vytvořena z vodovzdorné překližky, která byla pro zlepšení prostorové tuhosti opatřena výstužnými horizontálními žebry. Veškeré spoje byly zajištěny lepidlem a spojeny vruty. Do dna nádrže bylo umístěno výpustné potrubí a na stěnu nádrže byl připevněn piezometr, který byl vytvořen z průhledné trubice a osazen svinovacím metrem.

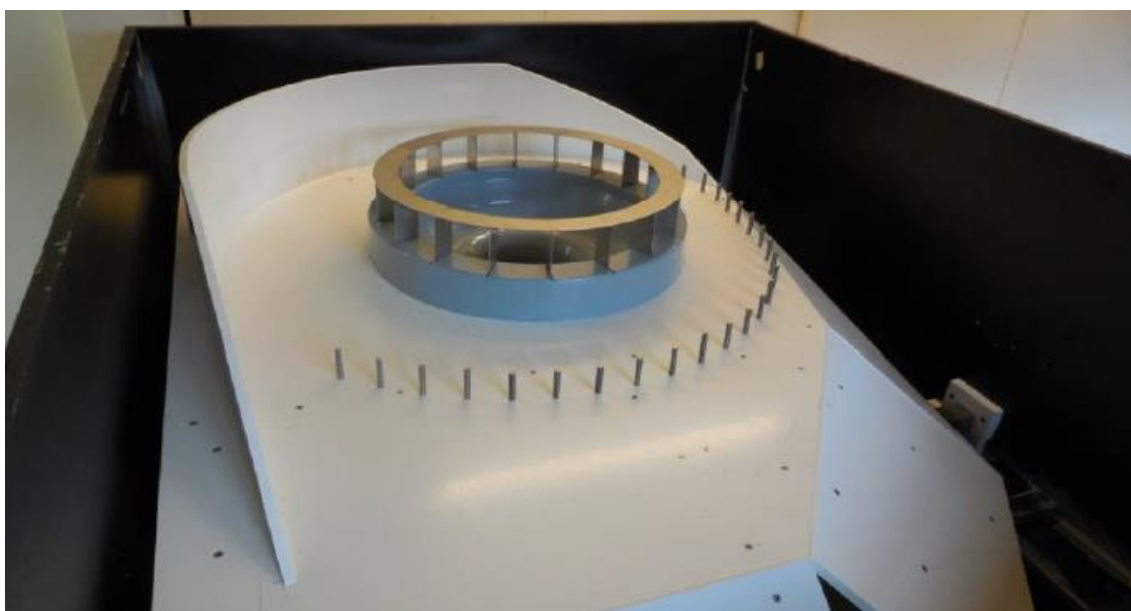
Odpadní šachta byla vzhledem k atypickému tvaru vytvořena ze sklolaminátu (Obr. 5.2). Vnitřek šachty byl pomocí hliníkové pásky zvrásněn tak, aby drsnost šachty co nejvíce odpovídala skutečnému stavu.



Obr. 5.2 Koleno šachtového přelivu [7]

Prostor šachtového přelivu byl vytvořen z polyvinylchloridu. Tento prostor byl vymodelován v takovém rozsahu, aby bylo umožněno dobře popsat proudění v okolí šachtového přelivu. Model byl vytvořen po záchytný systém pláví, dále již nebylo nutno model vytvářet, protože z důvodu vzdálenosti nedocházelo k žádnému ovlivňování proudění.

Záchytný systém pláví byl vytvořen ze stojin, které byly vyrobeny z nerezové oceli. Tyto stojiny byly přišroubovány do prostoru před šachtový přeliv (Obr.5.3).



Obr. 5.3 Šachtový přeliv [7]

Model byl shora osazen konstrukcí, která umožňovala posun měřicího zařízení v ose  $x$  a na ní kolmé ose  $y$ . Posun byl prováděn po vzdálenostech 0,05 m a po každém posuvu byla konstrukce zajištěna proti



dalšímu posunu. Měřené body odpovídaly rastru bodů, který byl vytvořen v programu AutoCad 2013.

## 5.3 Měřidla

### 5.3.1 UVP monitor

UVP (Ultrasonic Velocity Profiling) je označení metody i vlastního zařízení, které slouží pro měření okamžité hodnoty rychlostního profilu [10]. Měření probíhá podél osy vysílaného ultrazvukového paprsku a měří rychlost za pomoci detekce dopplerovského posuvu odraženého ultrazvuku v závislosti na čase. Pomocí UVP převodníku lze měřit pouze jeden průmět celkového rychlostního pole, ale pokud se provede měření více převodníky současně, lze mapovat proudové pole.

### 5.3.2 Princip měření

Převodník vyšle v měřené kapalině podél své měřicí osy krátký ultrazvukový impuls, poté se přepne do režimu pro příjem ultrazvukových impulsů [11]. Vyslaný impuls narazí na drobné částice v kapalině a část vyslaného signálu se odrazí zpět do převodníku. Odražený impuls dorazí do převodníku s jistým zpožděním

$$t = \frac{2x}{c}, \quad 5.7$$

kde  $t$  je časové zpoždění mezi vyslaným a přijatým signálem,  
 $x$  je vzdálenost částice od převodníku,  
 $c$  je rychlost zvuku v kapalině.

Zařízením UVP lze měřit polohu i rychlost určité částice v proudící kapalině. Tato funkce závisí na schopnosti změřit časový posuv  $t$  a dopplerovský posuv  $f_d$ . Jelikož zařízení neměří samotnou rychlost proudící kapaliny, ale rychlost drobných částic, od kterých se ultrazvukový

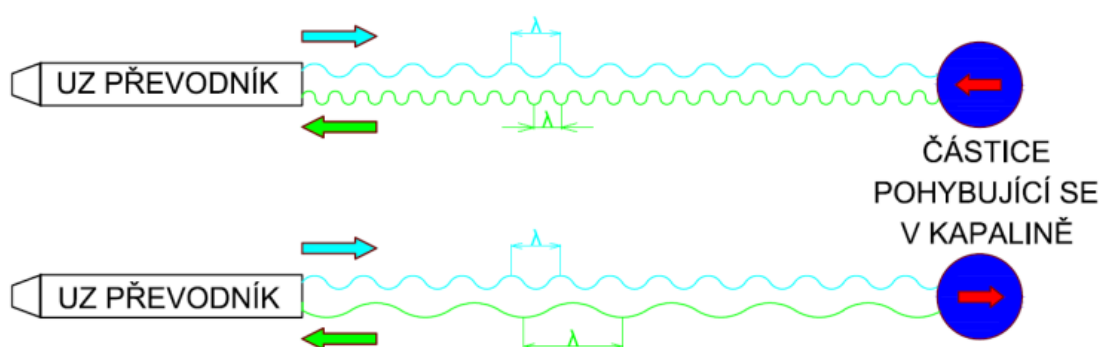
impulz odráží, je nutné, aby částice byly dostatečně malé a tudíž odpovídaly rychlosti proudící kapaliny. Výpočet rychlosti se provede dle rovnice

$$v = \frac{cf_d}{2f_o}, \quad 5.8$$

kde  $c$  je rychlost zvuku v kapalině,  
 $f_d$  je Dopplerovský posuv frekvence,  
 $f_o$  je vysílací frekvence.

### Dopplerovský posuv frekvence

Pokud se detektor a zdroj přibližují, dojde ke zvýšení frekvence přijímaného zvukového vlnění oproti původně vysílané frekvenci [11]. Pokud se detektor a zdroj navzájem vzdalují, dojde ke snížení frekvence přijímaného zvukového vlnění. Pokud je detektor a zdroj v klidu, nedojde k žádné změně frekvence. Na Obr. 5.4 je patrné, jaký má vliv Dopplerův posuv na měření rychlostí. Pokud měříme v médiu, kde částice proudí proti převodníku, dojde ke zvýšení frekvence a zároveň zkrácení vlnové délky. Naproti tomu, pokud měříme rychlosti v médiu, kde částice proudí směrem od převodníku, bude mít odražený signál nižší frekvenci a delší vlnovou délku.



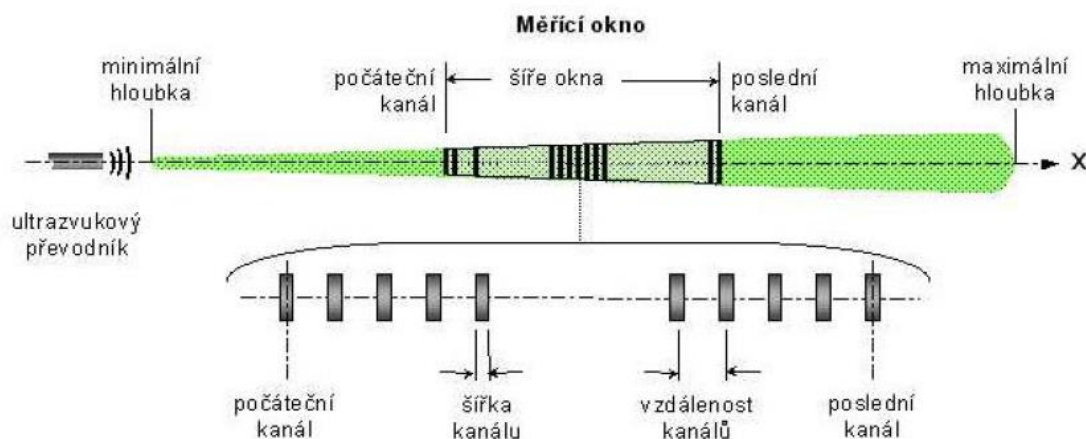
Obr. 5.4 Dopplerův jev [11]

### Měřicí kanál

Jedná se o šířku, ve které je zařízení UVP schopno měřit rychlostní profil [11].

## Měřicí okno

Jedná se o vzdálenost mezi středem počátečního kanálu a středem koncového kanálu (Obr. 5.5). Počet měřicích kanálů lze volit v rozmezí 10 až 2048.



Obr. 5.5 Měřicí okno [10]

Vzdálenost mezi středy dvou sousedních měřených objemů se nazývá vzdálenost měřicích kanálů. Tato vzdálenost je v celém měřicím okně konstantní. Vzdálenost měřicích kanálů se pohybuje v násobcích maximální šířky kanálu.

## Maximální měřitelná hloubka

Touto délkou se rozumí vzdálenost k nejvzdálenějšímu měřicímu kanálu. Přímo ovlivňuje délku měřicího okna. Nelze vyslat další impuls, pokud se ten předchozí nevrátil do převodníku z maximální měřitelné hloubky. Pokud se zvyšuje opakovací frekvence pulzů, klesá tím maximální měřitelná hloubka.

## Časový průběh měřicího cyklu

Jeden měřicí cyklus trvá 4 periody (Obr. 5.6). Lze ho rozlišit do 3 časových úseků:

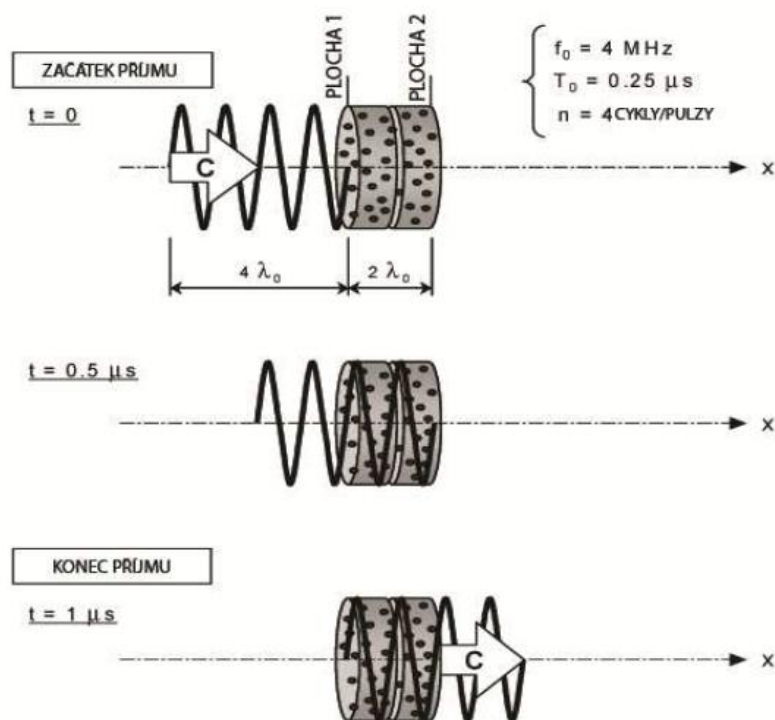
V čase  $t = 0 \mu s$  narazí přední strana impulsu do plochy 1. Částice, které se na ní nacházejí, odrazí část impulsu zpět a začíná generovat echo. K převodníku dorazí odražený signál bez zpoždění. Impulz se šíří dál skrze

kontrolní objem, při tom naráží na další částice a echo se k převodníku vrací s rostoucím zpožděním.

V čase  $t = 0,5 \mu\text{s}$  naráží přední strana impulzu do plochy 2. Nejvzdálenější částice začínají generovat echo, které dorazí se zpožděním  $0,5 \mu\text{s}$ .

V čase  $t = 1 \mu\text{s}$  naráží zadní strana impulzu do plochy 1. Částice, které se nacházejí blízko plochy 1, přestávají generovat echo, zatímco echo z plochy 2 dorazí k převodníku. Předtím, než dorazí k převodníku echo z plochy 2, převodník vypne režim příjmu, jelikož se tento signál již nachází mimo měřený kanál.

V případě měření ve vodě, za použití vysílací frekvence 4 MHz, je nejmenší měřitelná šířka kanálu 0,74 mm.



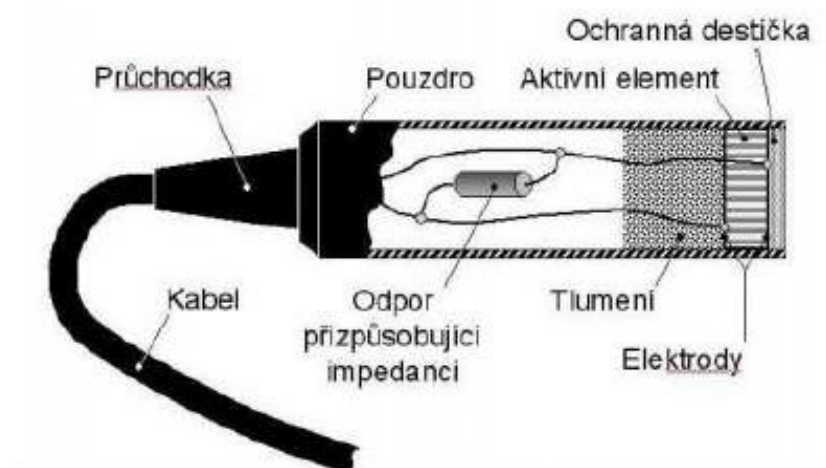
Obr. 5.6 Šířka kanálu [11]

### 5.3.3 Převodníky

Jedná se o zařízení, které umožňuje převádět elektrický signál na mechanickou odezvu a naopak a tím generovat ultrazvukové vlny [11]. Na vstupu se nachází elektrický signál s vysokou frekvencí, který je na aktivní

části převodníku přeměněn na ultrazvukový signál s vysokou frekvencí neboli vysokofrekvenční mechanické vlnění. Převodník umožňuje pracovat i v opačném směru a stává se z něj přijímač ultrazvukových vln. V tomto režimu dorazí mechanické vlnění na aktivní část převodníku a ta jej přemění na elektrický signál.

Převodník se skládá z několika základních částí (Obr. 5.7). Nejdůležitější jsou ty, které umožňují vysílání a příjem ultrazvukového signálu. Tyto části jsou: aktivní element, tlumení, elektrody a ochranná destička. Jelikož jsou všechny tyto součásti v přímém kontaktu s ultrazvukovým vlněním, je nutné, aby tyto komponenty byly vyrobené z materiálu, který je tomu akusticky impedačně uzpůsobený. Tím je myšleno, aby při průchodu vlnění nevznikaly na místech, kde se setkávají materiály s rozdílnou hustotou ztráty a nepřesnosti měření.



Obr. 5.7 Schéma ultrazvukového převodníku [11]

Aktivní část převodníku je element, který převádí ultrazvukovou energii na energii elektrickou. Nejčastěji se aktivní část vyrábí z polarizované keramiky, dále jsou vhodné piezoelektrické a ferroelektrické materiály. Hlavním požadavkem na tento element je, aby byl v případě, kdy je elektricky buzen, schopný kmitat ve vysokých frekvencích.

Tlumení převodníku je část převodníku, která umožňuje absorbovat akustickou energii, která je vyzářena ze zadní části aktivního elementu.

Materiál, z něhož je tlumení vyrobeno, musí mít vysokou měrnou hmotnost a vysoké absorpční vlastnosti, aby dobře plnil svoji funkci. Tlumení může být vyrobeno z materiálu, který má stejné akusticky impedační vlastnosti jako materiál ze kterého je vyroben aktivní element, nebo je vyroben z materiálu, který má rozdílnou akustickou impedanci než aktivní element.

Ochranná destička je vrstva materiálu, která se nachází mezi aktivním elementem a měřenou kapalinou. Slouží nejen jako ochrana vnitřních elementů převodníku, ale i jako jakýsi transformátor akustické impedance. Ochranná deska má nižší akustickou impedanci než aktivní element, ale o něco větší než jakou má měřená kapalina.

Převodníky se dělí na dva typy a to imerzní a kontaktní. Imerzní převodník je částečně nebo úplně ponořen do kapaliny, tudíž je v přímém a rovnoměrném kontaktu s měřeným médiem. Tento způsob je nej přesnější, jelikož jsou nejvíce minimalizované výchyly v citlivosti. Na Obr. 5.8 jsou zobrazeny imerzní převodníky od firmy Met-Flow.



Obr. 5.8 Ultrazvukový převodník firmy Met-Flow [12]

Druhým typem je kontaktní převodník, který je v přímém kontaktu s pevnou látkou. Nejdůležitější je, aby povrch byl velmi přesně opracovaný a převodník k ní mohl dolehnout plnoplošně, poté dosáhneme maximální kontaktní účinnosti. Kontaktní převodník se však pro UVP Monitor nepoužívá, je vhodnější pro nedestruktivní zjišťování závad uvnitř kovových konstrukcí.

## Výhody a nevýhody UVP Monitoru

Hlavní výhodou UVP monitoru je, že umožňuje měřit rychlost proudící kapaliny, aniž by byl vložen do měřeného média [10]. Díky této vlastnosti převodník negativně neovlivňuje proudění a měření je přesnější.

Převodník lze umístit i na vnější stranu potrubí. Nevýhodou této aplikace je však náchylnost na odraz, lom a absorpci zvuku a s tím spojené nepřesnosti měření. Díky této vlastnosti pak umožňuje měřit i rychlosti v médiích jako jsou roztavené kovy, čokoláda, odpadní vody a jiné neprůhledné kapaliny.

Nevýhodou UVP monitoru je, že je omezena vzdálenost do které je schopen rychlosti měřit. Další nevýhodou je, že pokud se umístí převodník na vnější stranu potrubí, je nutné na rozmezí převodník-potrubí aplikovat speciální ultrazvukový gel.

### 5.3.4 Hrotové měřidlo

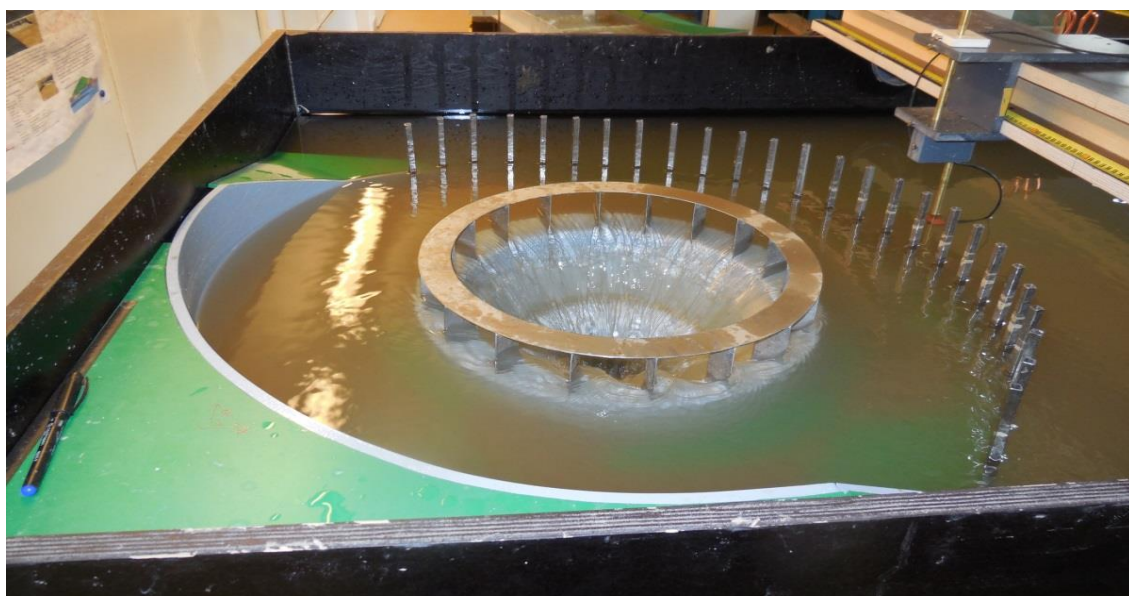
Jedná se o zařízení, sloužící k měření výšky hladiny. Digitální hrotové měřidlo je umístěno na konstrukci, která je vedena nad měřeným prostorem. Měření probíhá opatrným snižováním hrotu měřidla až k hladině. V momentě, kdy dojde ke spojení hladiny a suchého kovového hrotu měřidla, se zaznamená naměřená hodnota. Vlivem povrchového napětí a smáčivosti dochází ke styku kovového hrotu měřicího zařízení s vodou a následnému výstupu vody po stěně měřidla (kapilární elevace). Detail jevu kapilární elevace je zobrazen na Obr. 5.9. Digitální hrotové měřidlo umožňuje odečítat hodnoty na setiny milimetru. Chyba měření je vzhledem rozkolísanosti hladiny, provedení hrotu hrotového měřidla, rovnosti pojezdu a zkušenostem při odečtu odhadnuta na  $\pm 1$  mm.



Obr. 5.9 Kapilární elevace

## 5.4 Měření

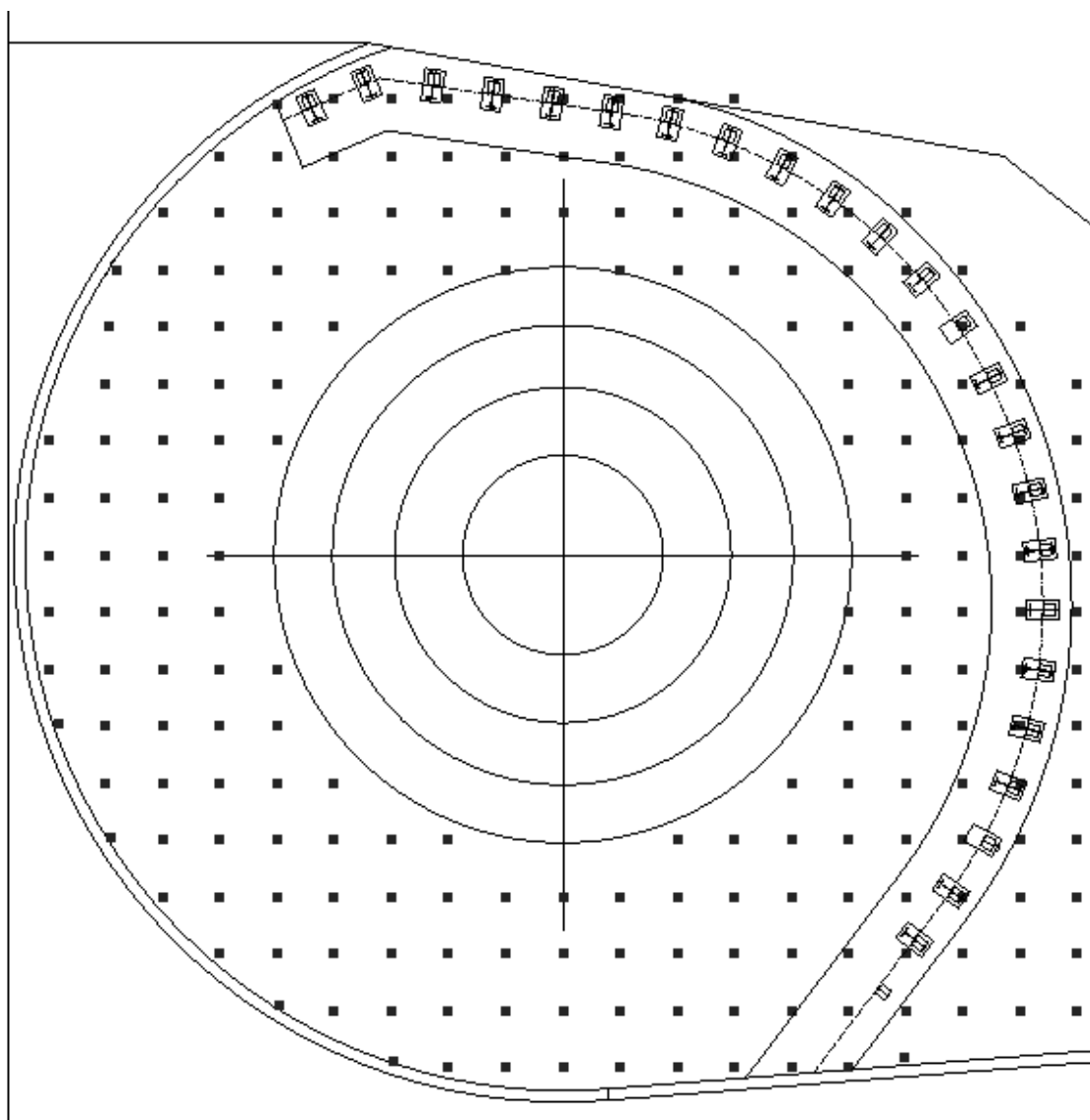
Měření bylo provedeno na fyzikálním modelu za navrhovaného stavu, tedy s vyplněnými podpěrami lávky na koruně přelivu a se záchytným systémem pláví, což je patrné na Obr. 5.10. Měřeno bylo při ustáleném stavu za průtoku  $Q = 16 \text{ m}^3/\text{s}$ , tedy při maximální hladině.



Obr. 5.10 Fyzikální model



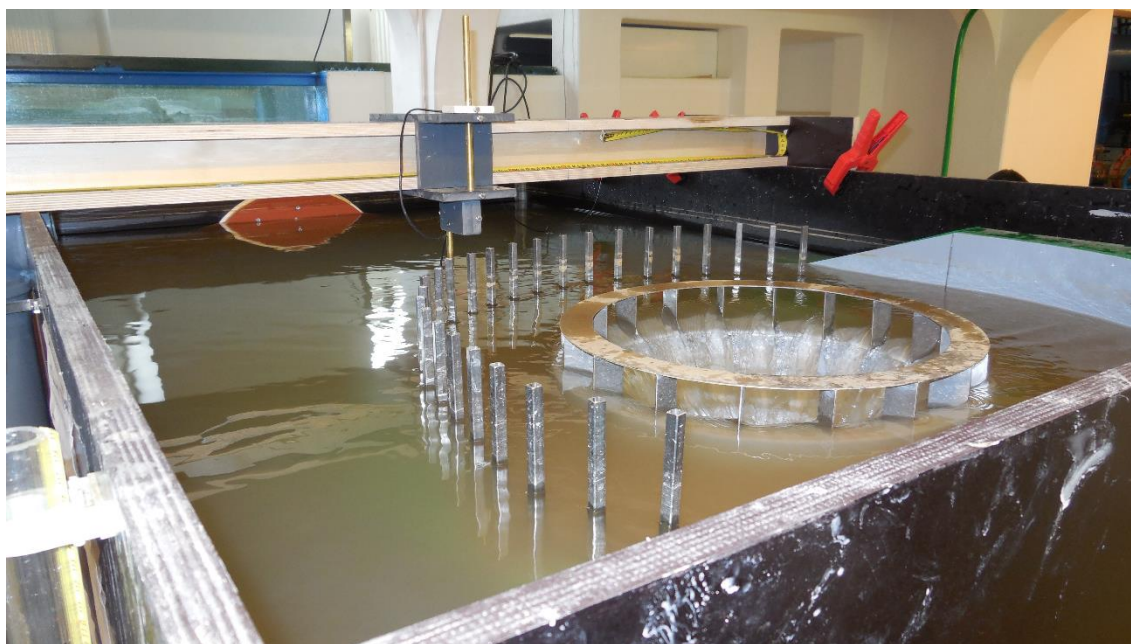
#### 5.4.1 Měření horizontálních rychlostí



Obr. 5.11 Rastr měřených bodů

Měření bylo provedeno na modelu ve 2 výškových úrovních. První měření probíhalo ve výšce 0,03 m nad dnem, druhé ve výšce 0,09 m nad dnem. Pozice měřených bodů odpovídala rozmístění, které bylo vytvořeno v programu AutoCad 2013. Tento rastr tvořilo 206 bodů, které od sebe byly vzdáleny 5 cm (Obr. 5.11). Měření pobíhalo ve dvou osách, které na sebe byly kolmé. Pokud to prostorové podmínky dovolovaly, vždy byla snaha nasměrovat ultrazvukový převodník čelem proti proudu. Při tomto umístění nedocházelo k ovlivňování proudu obtékáním převodníku a konstrukce jeho uchycení.

Pro měření byl zaveden pravoúhlý souřadnicový systém, jehož počátek byl umístěn do osy šachtového přelivu. Měřicí zařízení bylo připevněno na konstrukci, která umožňovala posun v x-ové a y-nové ose. Po každé změně měřené pozice bylo nutné svorkami pevně připevnit a zajistit vodící konstrukci proti posunutí a tím zajistit přesnost měření (Obr. 5.12).



Obr. 5.12 Pomocná konstrukce

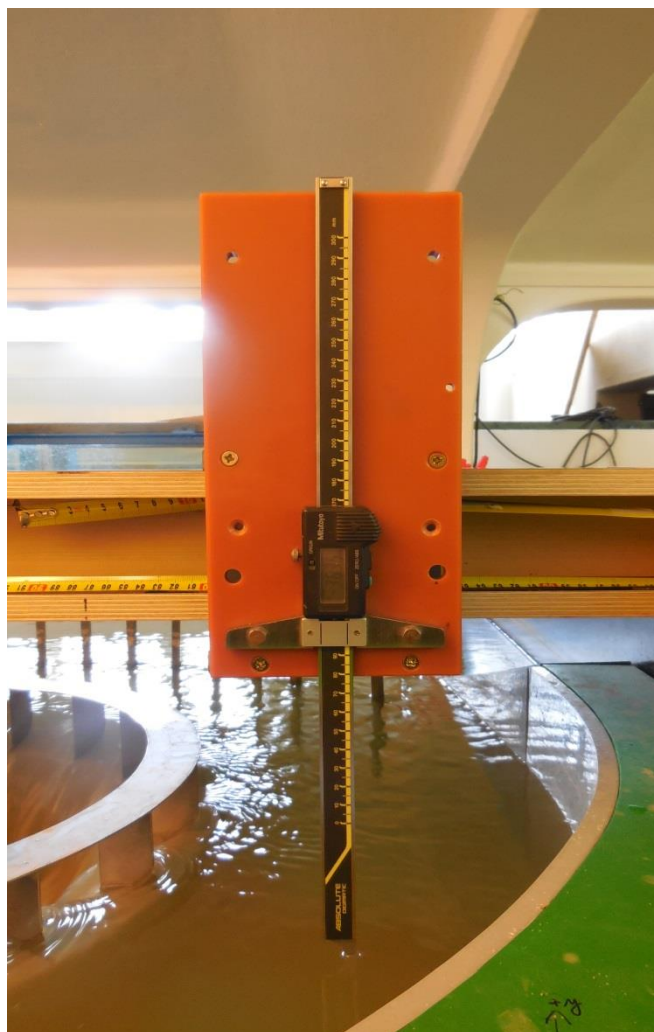
K vlastnímu měření rychlostí byl použit UVP Monitor XW-Psi. Měřicí element o průměru 0,005 m byl umístěn na pomocné konstrukci. Tato konstrukce byla vytvořena z polyvinylchloridových desek a mosazných tyčí o průměru 0,01 m. Čelní strana sondy byla odsazená o 0,04 m od místa měření, které vycházelo ze soustavy bodů, znázorněných na Obr. 5.9. Spodní část konstrukce umožňovala otáčení o 360° (Obr. 5.13). Před samotným měřením byla změřena teplota vody a podle ní nastavena rychlost šíření ultrazvukových vln ve vodě. Aby bylo možné změřit rychlost vody v okolí přelivu, byly do vody dávkované částice. Částice byly promíchány s vodou, čímž vznikla suspenze, která byla před každým měřením rychlostí dávkována v dostatečném množství. Jelikož UVP Monitor neměří rychlost proudící vody, ale rychlost částic v ní obsažených, bylo vlévání suspenze prováděno tak, aby nedošlo k ovlivnění proudění.



Obr. 5.13 Otočné zařízení

#### 5.4.2 Měření hladiny

Měření hladiny bylo provedeno za stejného průtoku  $Q = 16 \text{ m}^3/\text{s}$  a ve stejných souřadících  $x$  a  $y$ , ve kterých byla měřena rychlost proudění. Nejdříve byla nastavena nulová hodnota na měřidle, která byla vztažena ke koruně přelivu. Od této úrovně byla postupně měřena úroveň hladiny, která byla odečítaná na digitálním displeji. Měření bylo provedeno pomocí sestavy zobrazené na Obr. 5.14 za pomoci digitálního hrotového posuvného měřidla.



Obr. 5.14 Hrotové měřidlo

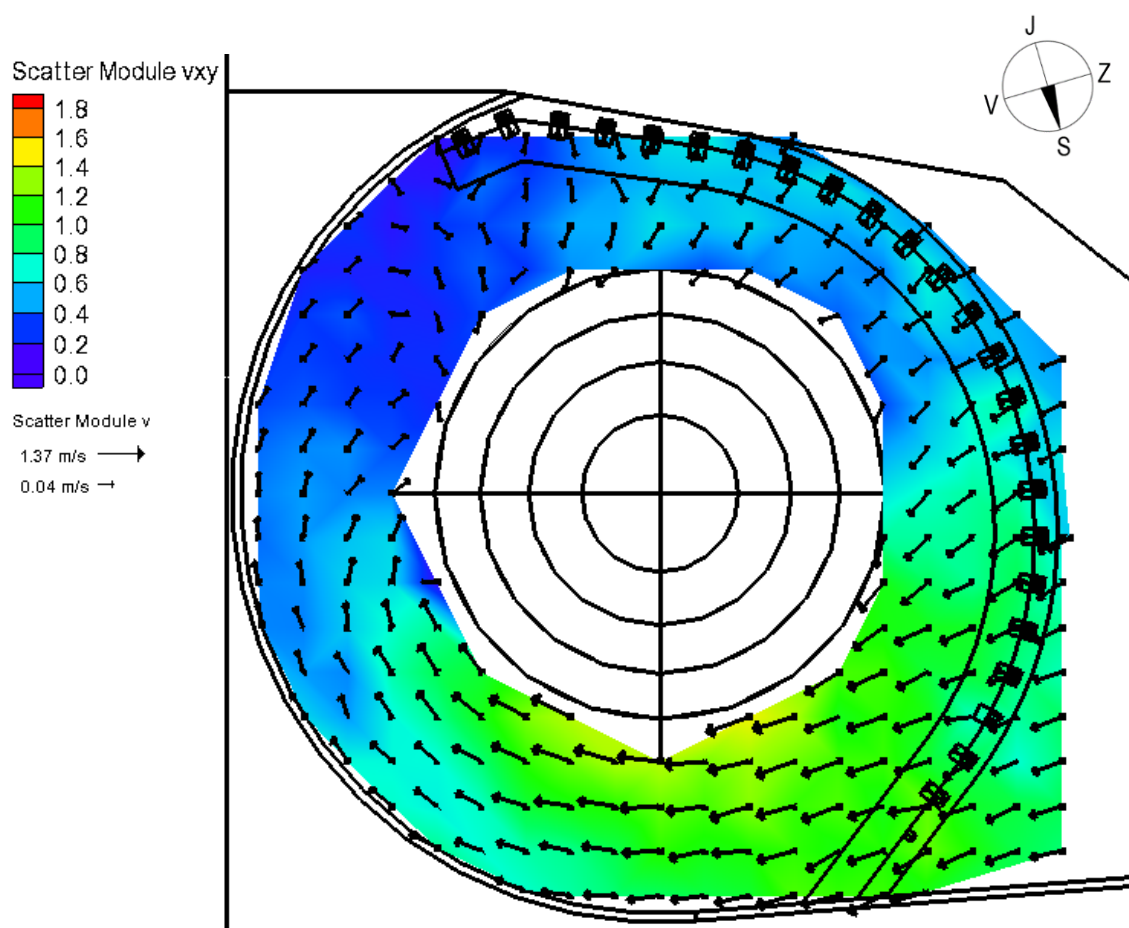
## 5.5 Vyhodnocení

### 5.5.1 Vyhodnocení rychlostí

Výstupem z měřicího zařízení UVP Monitor byly naměřené hodnoty rychlostí v x-ové a y-nové ose. Naměřené hodnoty složek rychlostí  $v_x$  a  $v_y$  byly poté převedeny pomocí programu Excel na rozměry prototypu a následně vloženy do programu SMS 11.0. Pomocí programu byly převedeny vektory na skaláry a následně vykresleny horizontální rychlosti v daných úrovních měření.

Průběh rychlostí v první úrovni měření, což odpovídá výšce 0,85 m nad úrovní terénu u prototypu, je zobrazen na Obr. 5.15. Tato úroveň se nachází přibližně v jedné čtvrtině výšky koruny přelivu. V obrázku horizontálních

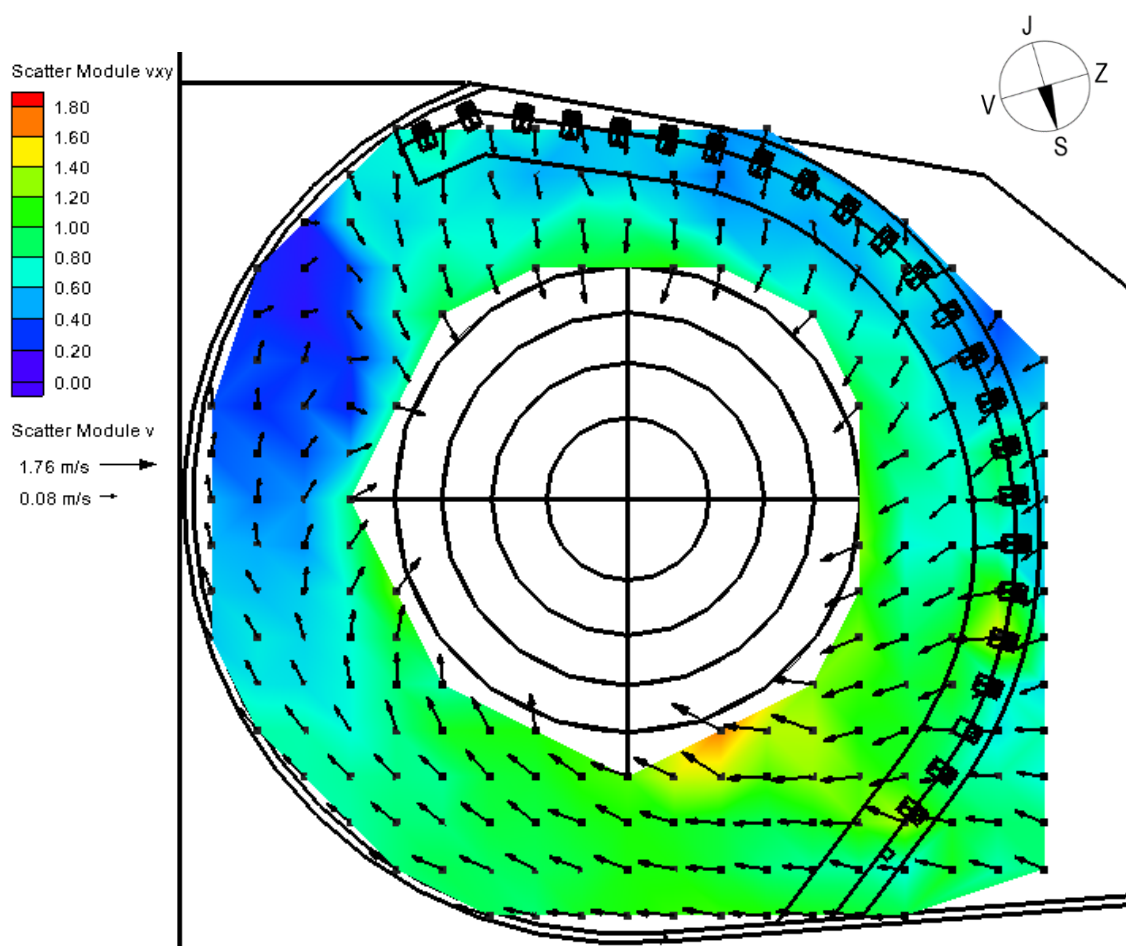
rychlostí je možno pozorovat směr přítoku vody k šachtovému přelivu a následné změny směru proudění. Před šachtovým přelivem dochází k rozdělení proudu a následnému obtékání kolem přelivu v severní části přelivu ve směru hodinových ručiček a v jižní části přelivu proti směru hodinových ručiček. Směr proudění vody v prostoru kolem přelivu dále kopíruje kruhový tvar přelivu a opěrnou zeď, jejíž půdorysný tvar odpovídá oblouku. Nejvyšší rychlosti jsou dosaženy v severní části prostoru, kde dochází k nejvýraznější změně směru proudění vody a to až 1,26 m/s. V jihovýchodní části prostoru za šachtovým přelivem je možno pozorovat výrazné zpomalení rychlostí a to až na hodnotu blíží se k 0 m/s.



Obr. 5.15 Horizontální rychlost v úrovni 0,85 m



Průběh horizontálních rychlostí při měření v úrovni 2,56 m nad terénem (respektive 0,56 m nad úrovní koruny přelivu) je zobrazen na Obr. 5.16. V porovnání s měřením, které bylo provedeno v úrovni 0,85 m, je možno pozorovat celkový nárůst rychlostí, jelikož se měřená úroveň nachází nad úrovní přelivné hrany. V místě, kde v předchozím měření docházelo ke snížení rychlosti na hodnotu blíží se k 0 m/s, je možné pozorovat zvýšení rychlostí až na hodnotu 0,54 m/s. Dále je možno pozorovat výrazný nárůst rychlostí v těsné blízkosti koruny šachtového přelivu, kde již dochází ke strhávání proudu přelivem. Nejvyšší rychlost byla naměřena opět na severní části přelivu v bodě, který se nachází těsně u koruny přelivu.

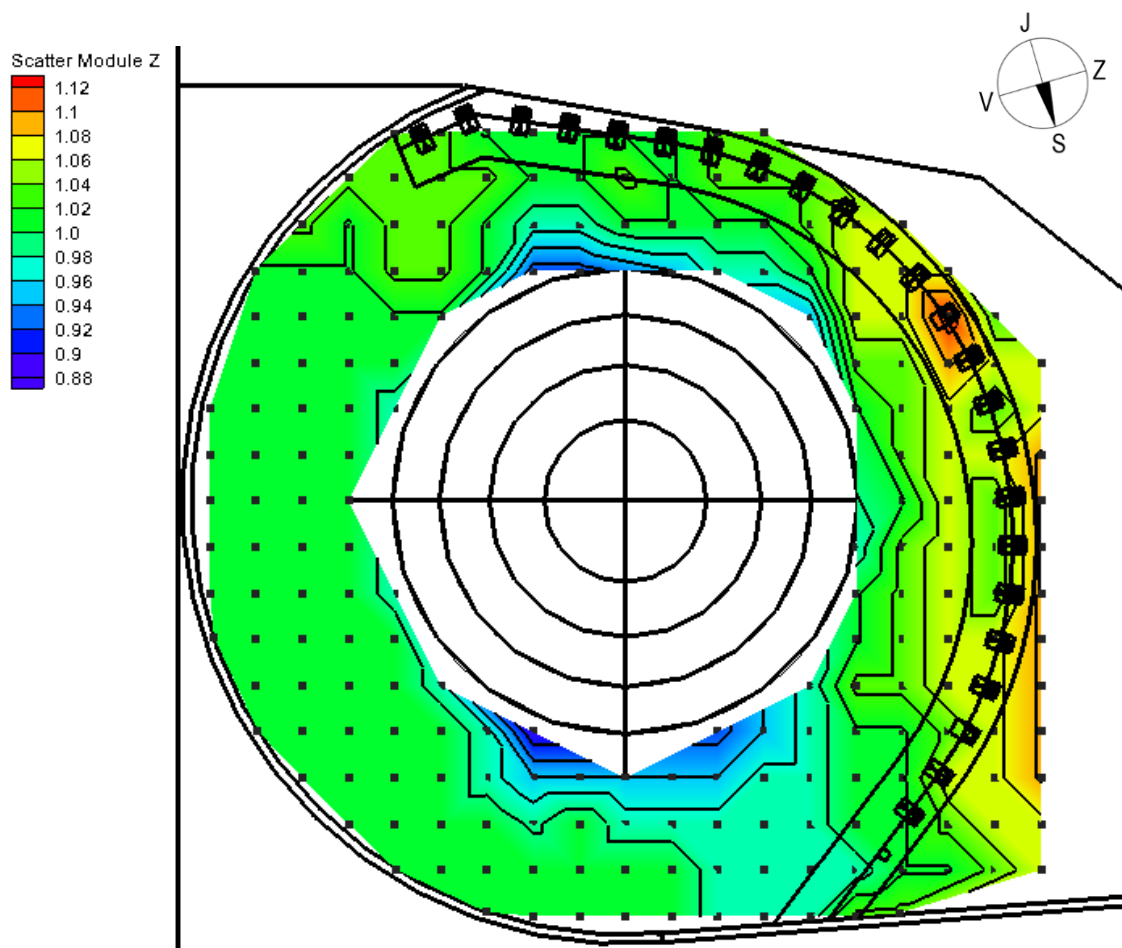


Obr. 5.16 Horizontální rychlost v úrovni 2,56 m

### 5.5.2 Vyhodnocení úrovně hladiny

Úroveň hladiny, která byla na modelu naměřena pomocí hrotového měřidla, byla poté pomocí programu Excel přepočtena na rozměry prototypu a vložena do programu SMS 11.0. V programu byla následně vykreslena úroveň hladiny v okolí šachtového přelivu.

Na Obr. 5.16 je patrné, že nejvyšší úroveň hladiny přepočtená na prototyp byla 1,11 m nad korunou přelivu v místě záchytného systému pláví. V okolí tohoto systému totiž docházelo k lokálnímu zvýšení úrovně hladiny vyvolanému zmenšením průtočného profilu. Z průběhu úrovně hladiny je zřejmé, že poproudě za záchytným systémem pláví dochází ke vzniku lokální deprese. Tento rozdíl úrovně hladiny před a za záchytným systémem pláví byl naměřen až 0,06 m. Z mapy je možno pozorovat zvýšení úrovně hladiny na jihovýchodní straně prostoru, které bylo způsobené střetnutím proudu, který obtékal přeliv po směru hodinových ručiček s proudem, který obtékal proti směru hodinových ručiček. Z důvodu zvýšení rychlostí v severní straně prostoru, došlo ke snížení úrovně hladiny, což vychází z předpokladu Bernoulliho rovnice. Nejvyšší hladina, která nebyla ovlivněna záchytným systémem, byla 1,03 m nad úrovní přelivné hrany a nacházela se v jihovýchodní části prostoru kolem přelivu. Nejnižší úroveň hladiny byla naměřena 0,88 m v severovýchodní části prostoru kolem šachtového přelivu.

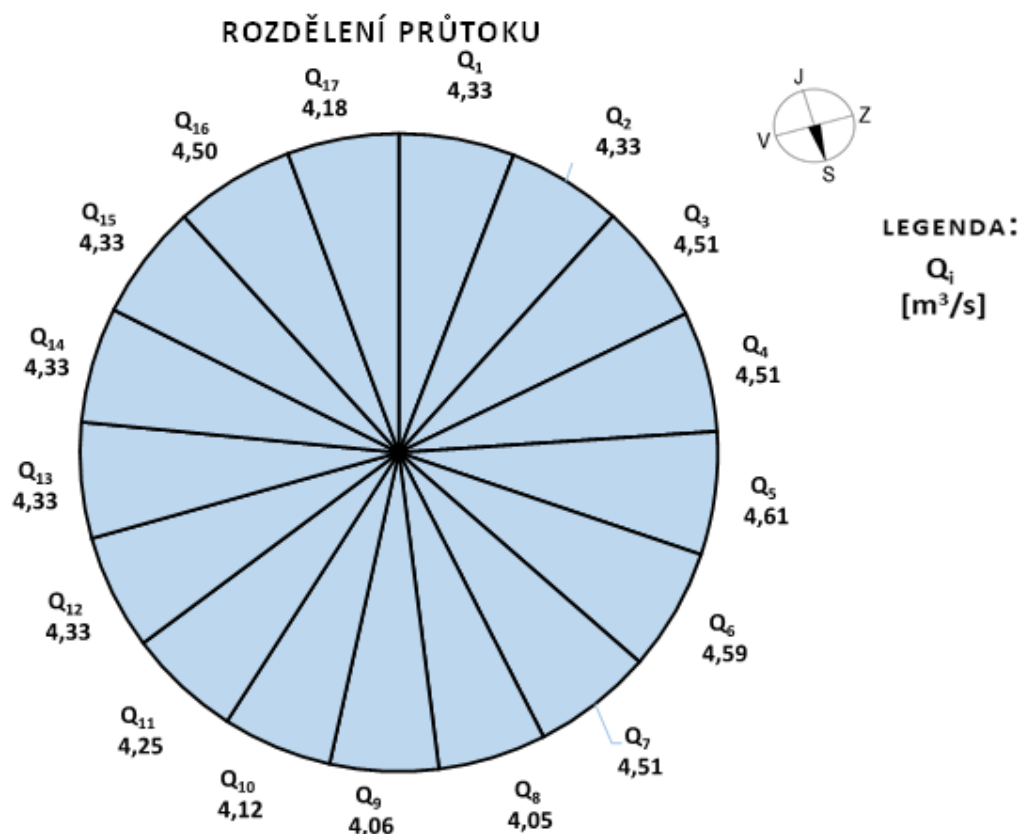


Obr. 5.17 Úroveň hladiny

### 5.5.3 Vyhodnocení rozdělení průtoku

Ve vzdálenosti  $3h$  od hrany koruny šachtového přelivu byly v programu SMS 11.0 odečteny odpovídající hodnoty výšky úrovně hladiny. Obvod šachtového přelivu (respektive jeho účinná délka) byla rozdělena na 17 úseků po vzdálenostech, které odpovídaly mezerám mezi plnostěnnými podpěrami lávky. Z rovnice přepadu (3.1) byla při dosazení průtoku  $Q = 71,8 \text{ m}^3/\text{s}$  a účinné délky přelivu  $b_0 = 44 \text{ m}$  vyjádřena odpovídající hodnota součinitele přepadu  $m = 0,368$ . Tato vypočtená hodnota přibližně odpovídá součiniteli přepadu pro přelivy se širokou korunou.





Obr. 5.18 Rozdělení průtoku

Pro každý dílčí úsek ve tvaru části kružnice, jenž má délku oblouku 2,66 m byla zjištěna hodnota průtoku  $Q_i$ . Vyhodnocení rozdělení průtoku je patrné na Obr. 5.18. Nejmenší hodnota dílčího průtoku  $Q_{10} = 4,12 \text{ m}^3/\text{s}$  byla naměřena v severovýchodní části přelivu. Nejvyšší hodnota dílčího průtoku  $Q_5 = 4,61 \text{ m}^3/\text{s}$  byla naměřena na severozápadní straně. V tomto místě byla zároveň naměřena jedna z nejvyšších hodnot úrovně hladiny. Hodnoty vypočtených průtoků jsou zobrazeny v Tab. 5.5. Podíl minimálního dílčího průtoku  $Q_{10}$  k maximálnímu dílčímu průtoku  $Q_5$  byl 0,894. Lze tedy konstatovat, že se výrazně neprojevuje vliv okolního terénu na rozdělení průtoku.

Tab. 5.5 Dílčí průtoky

	$h_i$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
1	0,998	4,33
2	0,998	4,33
3	1,026	4,51
4	1,026	4,51
5	1,040	4,61
6	1,037	4,59
7	1,026	4,51
8	0,955	4,05
9	0,956	4,06
10	0,965	4,12
11	0,985	4,25
12	0,998	4,33
13	0,998	4,33
14	0,998	4,33
15	0,998	4,33
16	1,024	4,50
17	0,975	4,18

## 6 Závěr a zhodnocení

Cílem práce bylo stanovit charakter proudění v okolí šachtového přelivu VD Labská při maximální hladině. Uvedené bylo provedeno změřením a vyhodnocením rychlostního pole v okolí šachtového přelivu a úrovně hladiny. Pro měření rychlostí bylo použito zařízení UVP Monitor XW PSi, pomocí kterého bylo možné dostatečně přesně změřit rychlosti. Pro měření úrovně hladiny bylo použito hrotové měřidlo.

Při měření rychlostí v úrovni 0,85 m nad úrovní terénu byly naměřeny hodnoty až 1,26 m/s. Při měření v úrovni 2,56 m nad terénem byly naměřeny vyšší hodnoty rychlostí, maximálně však 1,59 m/s. Vyšší rychlosti jsou způsobeny měřením v úrovni, která se již nachází nad úrovní bezpečnostního přelivu a dochází tedy ke strhávání proudu směrem do přelivu.

Jelikož byly rychlosti měřeny pouze ve dvou výškových úrovních, nebylo možno dokonale a přesně popsat proudění v okolí přelivu. Je tedy nutno konstatovat, že proudění na prototypu se může lišit vzhledem k možnostem vzniku sedimentů a zachycování pláví na systému stojin a na plnostěnných podporách lávky, které slouží k usměrnění proudu.

Při měření úrovní hladiny byly naměřeny nejvyšší hodnoty v místech, která se nacházejí před záchytným systémem pláví. Je to zapříčiněno obtékáním stojiny. Stojina hladinu vzduje a za ní vznikne úplav se sníženou úrovní hladiny. Z mapy úrovně hladiny je patrné její zvýšení v místě, kde se střetly oba proudy, které obtékaly přeliv po a proti směru hodinových ručiček. Dále je patrné, že v místě, kde jsou rychlosti vyšší, dochází ke snížení úrovně hladiny. Tento jev vychází z Bernoulliho rovnice.

Při výpočtu dílčích průtoků byly stanoveny hodnoty průtoků mezi jednotlivými plnostěnnými podpěrami lávky (17 částí). Z grafu rozdělení průtoků po délce koruny šachtového přelivu je patrné, že nejvyšší hodnota průtoků 4,61 m<sup>3</sup>/s byla naměřena v severozápadní části přelivu, kde byla v předchozím měření naměřena nejvyšší úroveň hladiny. Minimální hodnota průtoků 4,05 m<sup>3</sup>/s byla naměřena na severní části přelivu, kde byla

naměřena nejnižší úroveň. Podílem minimálního dílčího průtoku  $Q_{10}$  k maximálnímu dílčímu průtoku  $Q_5$  bylo zjištěno, že na šachtovém přelivu přehrady Labská nemá okolní terénu významný vliv na rozdělení průtoků po délce koruny, jelikož je tomuto negativnímu ovlivňování zamezeno vytvořením dostatečně širokého volného prostoru kolem přelivu.

## 7 Seznamy

### 7.1 Seznam obrázků

OBR. 3.1 ŠACHTOVÝ PŘELIV.....	3
OBR. 3.2 KONZUMČNÍ KŘIVKA ŠACHTOVÉHO PŘELIVU [3] .....	6
OBR. 4.1 LABSKÁ PŘEHRADA [5] .....	7
OBR. 4.2 ŘEZ ŠACHTOVÝM PŘELIVEM [8] .....	9
OBR. 4.3 SITUACE HRÁZE [8].....	10
OBR. 4.4 OBTOKOVÝ TUNEL [8].....	10
OBR. 5.1 ZÁCHYTNÝ SYSTÉM PLÁVÍ [7] .....	11
OBR. 5.2 KOLENO ŠACHTOVÉHO PŘELIVU [7] .....	15
OBR. 5.3 ŠACHTOVÝ PŘELIV [7] .....	15
OBR. 5.4 DOPPLERŮV JEV [11] .....	17
OBR. 5.5 MĚŘICÍ OKNO [10].....	18
OBR. 5.6 ŠÍŘKA KANÁLU [11] .....	19
OBR. 5.7 SCHÉMA ULTRAZVUKOVÉHO PŘEVODNÍKU [11] .....	20
OBR. 5.8 ULTRAZVUKOVÝ PŘEVODNÍK FIRMY MET-FLOW [12] .....	21
OBR. 5.9 KAPILÁRNÍ ELEVACE .....	23
OBR. 5.10 FYZIKÁLNÍ MODEL.....	23
OBR. 5.11 RASTR MĚŘENÝCH BODŮ.....	24
OBR. 5.12 POMOCNÁ KONSTRUKCE.....	25
OBR. 5.13 OTOČNÉ ZAŘÍZENÍ .....	26
OBR. 5.14 HROTOVÉ MĚŘIDLO .....	27
OBR. 5.15 HORIZONTÁLNÍ RYCHLOST V ÚROVNI 0,85 M .....	28
OBR. 5.16 HORIZONTÁLNÍ RYCHLOST V ÚROVNI 2,56 M .....	29
OBR. 5.17 ÚROVEŇ HLADINY.....	31
OBR. 5.18 ROZDĚLENÍ PRŮTOKU .....	32

### 7.2 Seznam tabulek

TAB. 4.1: N-LETÉ PRŮTOKY [7] .....	9
TAB. 5.5: DÍLČÍ PRŮTOKY.....	33

### 7.3 Seznam veličin

$Q$	průtok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$m$	součinitel přepadu [-]
$b_0$	účinná šířka přelivu [m]
$g$	tíhové zrychlení [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
$h$	přepadová výška [m]
$D$	průměr koruny přelivu [m]
$\mu$	součinitel výtoku [-]
$S$	plocha průřezu [ $\text{m}^2$ ]
$H$	tlaková výška [m]
$l$	vztažná délka [m]
$t$	vztažný čas [s]
$F$	vztažná síla [N]
$v$	charakteristická rychlost [ $\text{m}/\text{s}$ ]
$\nu$	kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\sigma$	povrchové napětí [ $\text{N}/\text{m}$ ]
$x$	vzdálenost částice od převodníku [m]
$c$	rychlost zvuku v kapalině [ $\text{m}/\text{s}$ ]
$f_d$	Dopplerovský posuv frekvence [Hz]
$f_0$	vysílací frekvence [Hz]
$v_x$	rychlost proudění v ose x [ $\text{m}/\text{s}$ ]
$v_y$	rychlost proudění v ose y [ $\text{m}/\text{s}$ ]

### 7.4 Seznam zkratk

UVP	Ultrasonic Velocity Profilling
VUT	Vysoké učení technické
FAST	Fakulta stavební
VD	Vodní dílo
MVE	Malá vodní elektrárna

## 8 Seznam použité literatury

- [1] ČSN 75 2340 Navrhování přehrad - Hlavní parametry a vybavení. Praha, 2004.
- [2] VOTRUBA, L., V. BROŽA a I. KAZDA. Přehrady. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1979, 332 s.
- [3] KANTOR, M. Hydraulika bezpečnostních přelivů vodních děl za extrémních průtoků [online]. Praha, 2007 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/vyzkum/nejistoty/preliv\\_soubory/Kantor\\_DP.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/vyzkum/nejistoty/preliv_soubory/Kantor_DP.pdf). Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Sklenář, Ph.D.
- [4] STRÁSKÝ, J. Přehrady Čech, Moravy a Slezska: průvodce. Vyd. 1. Liberec: Knihy 555, 2010. ISBN 9788086660311.
- [5] Labská přehrada - Labska dam. In: Panoramio [online]. b.r. [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.panoramio.com/photo/90862994>
- [6] Přehrada Labská na Labi v ř. km 1083,025. In: Povodí Labe [online]. b.r. [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: [http://www.pla.cz/planet/public/vodnidila/prehrada\\_labska.pdf](http://www.pla.cz/planet/public/vodnidila/prehrada_labska.pdf)
- [7] ZACHOVAL, Z. Modelový výzkum uspořádání nových spodních výpustí v obtokovém tunelu VD Labská. Brno, 2015.
- [8] Manipulační řád vodního díla na Labi: Labská. Hradec Králové, 2011.
- [9] JANDORA, J. a J. ŠULC. Hydraulika: modul 01. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 9788072045129.
- [10] JANALÍK, J. Měření turbulentních fluktuací rychlosti. Ostrava, 2006. Bakalářská práce. Vysoká škola Báňská – Technická Univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
- [11] KÁRNÍK, J. MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ V KAPALINÁCH POMOCÍ UVP. Brno, 2011. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. JAROSLAV ŠTIGLER, Ph.D.
- [12] View\_inline. In: Met-Flow [online]. [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: [http://www.met-flow.com/download\\_file/view\\_inline/20](http://www.met-flow.com/download_file/view_inline/20)